

# ESTACIÓN DE CARGA RÁPIDA DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO UTILIZANDO ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA MAGNÉTICA POR SUPERCONDUCCIÓN (SMES)



Daniel Alejandro Suárez Monsalve



# **ESTACIÓN DE CARGA RÁPIDA DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO UTILIZANDO ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA MAGNÉTICA POR SUPERCONDUCCIÓN (SMES)**

Daniel Alejandro Suárez Monsalve

Trabajo de grado presentado como requisito  
parcial para optar al título de  
Ingeniero Electricista

Pereira, Diciembre de 2017  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
Programa de Ingeniería Eléctrica.



ESTACIÓN DE CARGA RÁPIDA DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO UTILIZANDO ALMACENAMIENTO  
DE ENERGÍA MAGNÉTICA POR SUPERCONDUCCIÓN (SMES)  
©Daniel Alejandro Suárez Monsalve

Director: Alejandro Garces Ruiz

Pereira, Diciembre de 2017  
Programa de Ingeniería Eléctrica.  
Universidad Tecnológica de Pereira  
La Julita. Pereira(Colombia)  
TEL: (+57)(6)3137122  
*www.utp.edu.co*

Versión web disponible en: *<http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisd/index.html>*

# Agradecimientos

Agradezco a mi madre que desde el cielo es mi guía y mi fortaleza para seguir adelante, su sonrisa en mi mente es el motor que me impulsa a hacer las cosas bien y seguir luchando por mis sueños, agradezco también a todos los familiares y profesores que me acompañaron en todo este proceso tan importante de mi vida instruyéndome y motivándome para seguir adelante, gracias de todo corazón por todo, que Dios les brinde mucha salud y bendiciones a cada uno de ellos.



# Resumen

En este trabajo se estudiará la aplicación en una estación de carga rápida empleando el sistema de almacenamiento de energía por superconducción, conocido por sus siglas en inglés como SMES (superconducting Magnetic Energy Storage), este tipo de almacenamiento utiliza una bobina superconductora a la energía de almacenamiento en un campo magnético. La bobina conductora se enfría a niveles cero absolutos para reducir al máximo las pérdidas del efecto joule.

Por estas condiciones el sistema SMES es altamente eficiente y además es un elemento ideal para aplicaciones que requieran grandes cantidades de potencia en cortos instantes de tiempo, como las estaciones de carga rápida. Inicialmente para el acoplamiento entre el sistema de potencia y el sistema de almacenamiento es necesario emplear convertidores electrónicos de potencia de tipo AC/DC en éste caso un rectificador trifásico el cual es un dispositivo electrónico capaz de convertir una corriente alterna de entrada en una corriente continua de salida, mediante dispositivos semiconductores capaces de manejar grandes potencias, después se emplea una acción de control PI para manejar la tensión en la entrada del DC chopper permitiendo adecuar la carga del SMES, una vez el SMES está cargado comienza el proceso de almacenamiento de la energía donde la corriente a través de él no se descompondrá y su energía magnética puede almacenarse indefinidamente, posteriormente ésta energía será inyectada a la batería del vehículo eléctrico mediante otro DC chopper, con ésta configuración se evita que el vehículo que ingrese a la estación de carga requiera un cargador interno para alimentar la batería, el proceso de carga del vehículo eléctrico será totalmente dependiente de la energía almacenada en el SMES más no de la red eléctrica a la cual que se encuentre conectada la estación de carga.





# Tabla de Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Planteamiento del problema . . . . .	3
1.2	Justificación . . . . .	4
1.3	Objetivos . . . . .	4
1.3.1	General . . . . .	4
1.3.2	Específicos . . . . .	4
1.4	Estado del arte . . . . .	5
1.4.1	Uso en la actualidad del SMES en la carga de vehículos eléctricos . .	5
1.4.2	Estado actual de los vehículos eléctricos . . . . .	6
1.5	Resultados . . . . .	7
1.6	Estructura del trabajo de grado . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Diseño de estación de carga rápida para vehículo eléctricos empleando SMES</b>	<b>9</b>
2.1	Modos de operación con el DC CHOPPER . . . . .	11
2.1.1	Modo de carga del SMES . . . . .	11
2.1.2	Modo de almacenamiento de energía del SMES . . . . .	12
2.1.3	Modo de descarga de energía del SMES . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Simulación de estación de carga rápida para vehículos eléctricos empleando SMES</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Resultados de simulación de estación de carga rápida para vehículos eléctricos empleando SMES</b>	<b>19</b>
4.1	Operacion de la estación de carga para vehiculos eléctricos gama media . . .	19
4.1.1	Comportamiento del SMES . . . . .	20
4.1.2	Comportamiento de la batería del vehículo . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>25</b>



# Capítulo 1

## Introducción

En la vida moderna es indispensable la red eléctrica, puesto que el desarrollo tanto económico como social está acompañado del sistema eléctrico, la cual experimenta retos técnicos, sociales, ambientales y económicos que definirán su configuración futura.

El sistema eléctrico nacional debe contemplar la transición energética a la que se ven sometidos diferentes países a nivel mundial, esta transición afecta directamente la operación de la red eléctrica como se conoce hoy en día ya que impulsa a al uso de la energía eléctrica en sectores como el del transporte el cual representa una gran parte de la demanda nacional de energía, esto con el fin de disminuir el impacto ambiental causado por la emisión de  $\text{Co}_2$  y a su vez bajar la dependencia que se tiene para producir energía mediante combustibles fósiles.

El coche eléctrico es una eficaz herramienta que respalda el proceso de transición ya que permitiría empezar a controlar las emisiones de  $\text{Co}_2$  y otros contaminantes producidos por la actividad del transporte.

Ante el cambio climático y el deterioro del medio ambiente, la humanidad se enfrenta a la necesidad de reducir o eliminar las emisiones de gases de efecto invernadero que las actividades humanas producen. Es por ello por lo que estamos asistiendo a un desarrollo masivo de fuentes de energías renovables libres de emisiones de  $\text{Co}_2$ .

Numerosos países ya han comprendido el importante papel que el coche eléctrico puede jugar en el futuro y ya existen diversas políticas para ayudar e incentivar la difusión de esta tecnología que cuenta con diferentes ventajas como mejorar la calidad del aire en las ciudades ya que los automóviles eléctricos no emiten ningún contaminante a la atmósfera en su funcionamiento. De esta forma las ciudades, lugares donde se concentran enormes cantidades de coches y cuyo aire se encuentran habitualmente densamente contaminado a causa de los automóviles de combustión, por otra parte, también brinda una reducción de la contaminación acústica ya que el coche eléctrico casi no genera ruido en su funcionamiento al contrario que los coches convencionales con sus motores de explosión. Las ciudades, debido

el intenso tráfico de los vehículos de combustión que presentan, son espacios tremendamente ruidosos. Todos estos factores influyen directamente en los niveles de la salud en los habitantes de las ciudades lo cual es de vital importancia.

Esta integración permite aumentar el porcentaje de energía proveniente de las fuentes renovables a la generación total de electricidad, por lo tanto, se incrementa la sostenibilidad de la electricidad y en teoría aumenta la fiabilidad del sistema, la seguridad, la flexibilidad y la accesibilidad a la energía eléctrica [1].

Sin embargo, algunas energías renovables que se pretenden implementar en esta transición pueden ser particularmente afectadas por parámetros externos como los medio ambientales, haciendo que este tipo de recurso sea inherentemente variable e intermitente en algunos casos [1], especialmente se presenta cuando hay días nublados o sin brisa, lo que disminuye la producción de energía eléctrica proveniente de paneles fotovoltaicos y granjas eólicas, respectivamente, por esta razón para utilizar la energía renovable de manera adecuada y sin tener problemas relacionados con la variabilidad, la intermitencia de la energía, y la inestabilidad de la red eléctrica, debe ser diseñado e implementado un sistema de almacenamiento robusto el cual permita al sistema de potencia local interactuar con fuentes de energía renovables de diferentes características, con capacidad de operar en amplios rangos de densidad de potencia y de densidad de energía. Dado que ninguna tecnología de almacenamiento de energía por si sola tiene esta capacidad, el sistema debe incorporar una combinación de diferentes tecnologías, como súper-condensadores, baterías, superconductores magnéticos de almacenamiento de energía.

Un sistema energético se basa en la capacidad para generar energía suficiente, con el fin de atender la demanda a precios razonables y en condiciones medioambientales y de confiabilidad adecuadas, por lo cual la utilización adecuada de un sistema de almacenamiento de energía, puede llegar a ser competitiva a nivel técnico y económico en comparación con tecnologías basadas en combustibles fósiles o nucleares [2].

Los vehículos eléctricos no comenzarán a rodar si no existe la infraestructura que pueda soportar su operación. A pesar de que la energía eléctrica está disponible en todo lugar, para cargar los automóviles es necesario contar con la capacidad de la red necesaria y los equipos adecuados para hacerlo. Los usuarios de vehículos están acostumbrados a que los tienen listos para uso casi todo el tiempo, además hay sectores económicos en los que la disponibilidad es una necesidad.

De manera que la alternativa en que se debe esperar 8 horas para recargar el carro no es una opción. Debido a esto nace la necesidad de encontrar sistemas que permitan una recarga rápida y efectiva de forma similar a la de los coches de combustión.

Para esto se debe analizar el método de carga de las baterías de los vehículos eléctricos que me permita optimizar el tiempo de carga de dichos vehículos.

Para optimizar los métodos de carga se plantea un método experimental en este campo

llamado (SMES) basado en el almacenamiento superconductor de energía magnética, es una tecnología novedosa que almacena electricidad de la red dentro del campo magnético de una bobina compuesta por cable superconductor con una pérdida de energía casi nula [3].

SMES es un dispositivo habilitador de red que almacena y descarga grandes cantidades de energía casi instantáneamente. El sistema es capaz de liberar altos niveles de potencia dentro de una fracción de un ciclo para reemplazar una pérdida repentina o una caída en la potencia de la línea [4]. La inyección estratégica de breves ráfagas de energía puede jugar un papel crucial en el mantenimiento de la confiabilidad de la red, especialmente con las líneas eléctricas cada vez más congestionadas de hoy en día y la alta penetración de fuentes de energía renovables, como la eólica y la solar.

Una SMES típica consta de dos partes: bobina superconductora refrigerada criogénicamente y sistema de acondicionamiento de energía, que son inmóviles y resultan en una mayor confiabilidad que muchos otros dispositivos de almacenamiento de energía. Idealmente, una vez que la bobina superconductora está cargada, la corriente no se descompondrá y la energía magnética puede almacenarse indefinidamente [5].

## 1.1 Planteamiento del problema

En los últimos años se ha podido observar un significativo interés en la sociedad para adoptar sistemas que sean más amigables con el medio ambiente, en cuanto al transporte este interés se ha enfocado al uso de vehículos eléctricos e híbridos con el fin de disminuir la dependencia al crudo y mitigar los daños que los vehículos a base de combustibles fósiles le causan al medio ambiente [6], este interés no solo ha sido adoptado por la sociedad sino también por diversos países a nivel mundial entre los cuales se encuentra Colombia el cual pretende emplear un plan energético nacional ideario en el cual se contemplan cambios en el sector de transporte y en otros campos de sector energético del país, esta metodología de cambio adoptada por diferentes naciones hace referencia a una transición energética la cual está relacionado con el cambio sobre cómo se usa energía hoy en día en la sociedad y se caracteriza por un cambio hacia energías renovables dejando atrás el modelo energético actual, caracterizado por el uso de energías convencionales; las cuales usan como materia prima gas, crudo, carbón entre otros, los cuales nos van haciendo cada vez más dependientes. Estos generan impactos negativos en el medio ambiente mediante su procesamiento como en su obtención y esto genera una enorme resistencia y rechazo por parte de sectores pro-ambientalistas.

Sin embargo, las tecnologías empleadas en los vehículos eléctricos se encuentran en una fase de desarrollo intermedia, ya que estas tecnologías aún no se encuentran optimizadas por ser relativamente nuevas, esto conlleva a algunas falencias a la hora hacer de los vehículos eléctricos e híbridos un medio de transporte óptimo para emplear en nuestra sociedad, como pretenden algunos gobiernos a nivel mundial.

Debido a esto es de vital importancia tratar optimizar el modelo de estos vehículos, y una forma de hacerlos es emplear unos métodos de carga de las baterías más eficientes por medio de una estación de carga rápida utilizando almacenamiento de energía magnética por superconducción (SMES) que permita a los usuarios cargar sus vehículos en un menor tiempo.

## 1.2 Justificación

En los últimos años se ha buscado una disminución en el uso de combustibles fósiles; por esta razón, se han desarrollado fuentes alternativas de energía amigables con el ambiente. Este es el caso del aumento en el uso de vehículos eléctricos [7], los cuales reducen significativamente el impacto ambiental generado por los combustibles fósiles de los vehículos tradicionales.

Este aumento en el uso de vehículos eléctricos trae consigo varios inconvenientes. Uno de ellos consiste en el impacto de estas cargas a las redes de distribución pues aumentan la demanda y pueden obligar a redimensionar dichas redes [8]. Otro de los inconvenientes en el uso de estos vehículos es su autonomía, puesto que los tiempos de carga de energía son largos y se deben realizar muy a menudo en comparación con los vehículos tradicionales que solo necesitan reabastecer su combustible para seguir en funcionamiento en poco tiempo.

Con el fin de dar solución a estos inconvenientes se pretende diseñar una estación de carga que mejore en un porcentaje significativo los tiempos de carga sin afectar en gran medida a la red. Para esto, se busca almacenar energía en un dispositivo diseñado para este fin que posteriormente se utilizara para recargar la batería de un vehículo eléctrico. Dicho dispositivo será un SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage), pues este presenta mayores niveles de eficiencia (mayores al 90 %) en comparación con otros dispositivos de almacenamiento como las baterías y flywheels (con eficiencias entre 60% y 70%).

Teniendo en cuenta que actualmente en el mercado se pueden conseguir SMES de pequeñas dimensiones, la implementación del sistema de carga propuesto se puede llevar a cabo fácilmente.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 General

Diseñar un sistema para carga rápida de un vehículo eléctrico utilizando almacenamiento de energía magnética por superconducción (SMES)

### 1.3.2 Específicos

- Alcanzar el estado del arte en SMES, vehículos eléctricos, convertidores AC/DC y DC/DC.

- Dimensionar la estación de carga y sus componentes como el SMES, la batería, el vehículo eléctrico y los convertidores.
- Diseñar una estrategia de control para la carga del SMES.
- Simular el modelo matemático usando Matlab®.
- Diseñar una estrategia de control para la carga del vehículo eléctrico con el SMES.
- Realizar pruebas y análisis de la estación de carga.
- Documentar los resultados de la investigación.

## 1.4 Estado del arte

### 1.4.1 Uso en la actualidad del SMES en la carga de vehículos eléctricos

Y. L. W. Shan Chuan Wang, Jian Xun Jin, “Smes efect in a smart grid with electric vehicles,” Center of Applied Superconductivity and Electrical Engineering University of Electronic Science and Technology of China, 2015.

En el artículo [9] los autores plantean un modelo que consiste en conectar un SMES a un bus AC al cual están conectadas las estaciones de carga de los vehículos eléctricos; en este modelo el SMES funciona inyectando potencia a la red para mantener los niveles de tensión, donde los autores llegan a la conclusión que el SMES puede brindar estabilidad a la red, manteniendo los niveles de tensión adecuados cuando entren estas cargas.

Y. Liu, “Application of small-sized smes in an ev charging station with dc bus and pv system,” Applied Superconductivity, IEEE Transactions on, 2014.

En el artículo [10], los autores plantean diferentes dispositivos para el almacenamiento de la energía, se resalta el SMES como el más adecuado para la tarea de carga que se desea realizar, pues este presenta mayores niveles de eficiencia, ya que la energía eléctrica no se debe transformar a otro tipo de energía (mecánica, química, etc.) a la hora de almacenarla, y por esta razón presenta menores niveles de pérdidas de energía a la hora de suministrarla.

Además, una de las ventajas principales del SMES frente a otros dispositivos de almacenamiento de energía (como baterías, flywheels y supercapacitores) es su capacidad de entregar grandes cantidades de potencia eléctrica de manera instantánea [], lo que convierte a este en el dispositivo principal para cumplir con el objetivo de carga rápida.

En el artículo, se propone una topología para la carga de un vehículo eléctrico con el uso de un SMES como se muestra en la figura 1.1, en la cual se plantea un bus de corriente continua donde van a ir conectados todos los elementos del sistema, pues cada uno de los

elementos de este modelo trabaja con corriente continua. Así pues, se plantea el uso de varios convertidores DC/DC con el fin de mantener la tensión constante en elementos como el panel fotovoltaico, el SMES y la estación de carga de la batería.

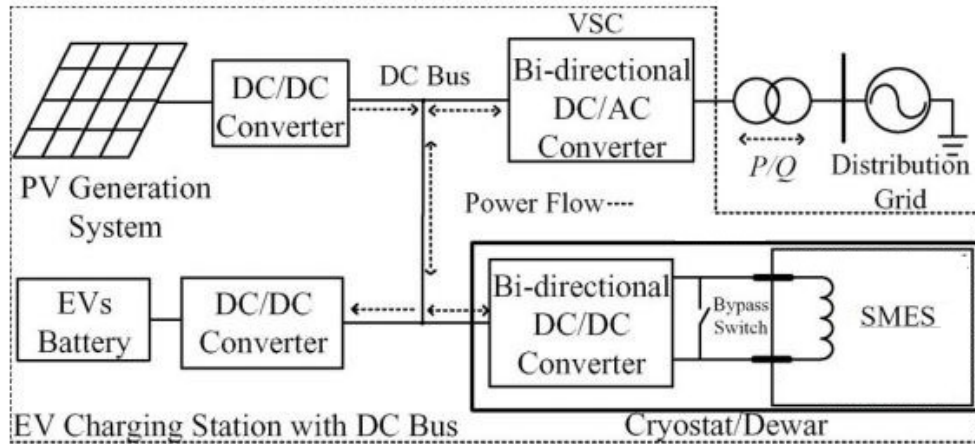


Figure 1.1: Topología de una estación de carga para un vehículo eléctrico con sistema PV y bus DC

Los autores llegan a la conclusión que el uso del panel fotovoltaico no es suficiente para mantener un flujo de potencia adecuado en el bus DC para los demás dispositivos, por lo cual se implementa un convertidor DC/AC bidireccional conectado a la red de distribución, el cual en caso de requerirlo permite inyectar o extraer potencia del sistema.

### 1.4.2 Estado actual de los vehículos eléctricos

“Guía para la promoción del vehículo eléctrico en las ciudades” Instituto para la diversificación y ahorro de la energía Madrid, 2011.

En la actualidad existen distintos tipos de vehículos eléctricos como son: Eléctrico puro, eléctrico híbrido y eléctrico de autonomía extendida. Cada uno de estos ofrece mayor o menor autonomía según la tecnología que utilice para la recarga de su batería. Como ejemplo, un vehículo eléctrico puro que dependa de la red de distribución para recargar su batería puede tener una autonomía desde 80 hasta 200 kilómetros.

Teniendo en cuenta que más del 80% del uso diario en el ámbito urbano es inferior a los 30 km, se puede decir que un vehículo con 80 kilómetros de autonomía se deberá cargar cada 2 a 3 días. Los tiempos de carga son el principal inconveniente de la carga doméstica pues dependen del nivel de tensión y corriente a la que se pueda conectar el vehículo. Por ejemplo, un vehículo comercial que cuenta con una batería de 7 KWh conectado a una tensión



de 220 V y a una corriente de 10 A demorará un promedio de 3 horas en terminar una carga completa.

Teniendo en cuenta lo anterior, se pretende mejorar los tiempos de carga domésticos de los vehículos eléctricos aprovechando la característica principal del SMES, pues este mediante el uso de convertidores DC/DC puede mantener un nivel de tensión adecuado para la carga del vehículo, pero entregando una cantidad superior de corriente, mejorando así el tiempo en el cual se realiza una carga completa de la batería, sin afectar a la red de distribución.

## 1.5 Resultados

Los principales resultados de este trabajo de grado son los siguientes

- Diseño de estación de carga para vehículos eléctricos empleando SMES
- Modelado en Matlab® de sistema de carga empleando SMES
- Un artículo en conferencia internacional

## 1.6 Estructura del trabajo de grado

Este proyecto está estructurado de la siguiente manera: en el Capítulo 2 se presenta la descripción y formulación matemática del sistema de carga para vehículos eléctricos empleando SMES, en este capítulo se hace énfasis en los elementos que conforman dicha estación de carga y en la parte operativa de cada uno de estos. En el capítulo 3 se presenta la metodología propuesta para el desarrollo de la simulación de la estación de carga para vehículos eléctricos empleando SMES. En el Capítulo 4 se realiza la aplicación de la metodología propuesta a varios sistemas de prueba y se analizan los resultados obtenidos. Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones derivadas de este trabajo y las propuestas sobre trabajos futuros relacionados al tema. Finalmente se encuentran las referencias bibliográficas y posteriormente los apéndices con información de los sistemas de prueba y los códigos implementados.



## Capítulo 2

# Diseño de estación de carga rápida para vehículo eléctricos empleando SMES

Para iniciar con la elaboración de un diseño de una estación de carga para un vehículo eléctrico es de vital importancia el conocimiento sobre las características y funcionamiento de los dispositivos de electrónica de potencia empleados ya sea bajo la configuración de inversor o rectificador, estas topologías son fundamentales para el diseño de la estación de carga con SMES.

Inicialmente se debe emplear un rectificador trifásico, un dispositivo electrónico capaz de convertir una corriente alterna de entrada en este caso proveniente de la red eléctrica en una corriente continua de salida mediante dispositivos semiconductores capaces de manejar grandes potencias en este caso diodos. En la figura 2.1 se ilustra el esquema del convertidor.

Una vez obtenida una salida en DC se debe implementar un control de carga adecuado para el SMES, el cual permita que éste se cargue lentamente demandando pequeñas cantidades de potencia de la red eléctrica, una configuración ideal en éste caso sería el DC Chopper que es básicamente un dispositivo electrónico de potencia estático que convierte la tensión o potencia de CC fija en tensión o potencia de CC variable. La topología consiste en interruptores de alta velocidad que conecta y desconecta la carga de la fuente a una tasa alta para obtener voltaje variable o cortado en la salida. Este dispositivo es muy necesario hoy en día ya que muchas aplicaciones industriales dependen de la fuente de voltaje de CC. El rendimiento de estas aplicaciones mejorará si usamos un suministro de CC variable. Ayudará a mejorar el control de los equipos también. Ejemplos de tales aplicaciones son vagones de metro, trolebuses, vehículos operados por batería, etc. En la figura 2.2 se muestra la conexión del DC chopper al SMES.

Gracias a los elementos de electrónica de potencia como los IGBT los cuales permiten un

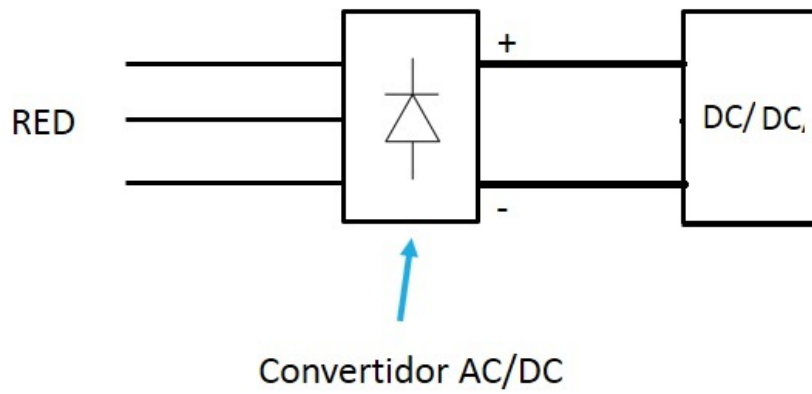


Figure 2.1: Convertidor AC/DC conectado a un DC Chopper

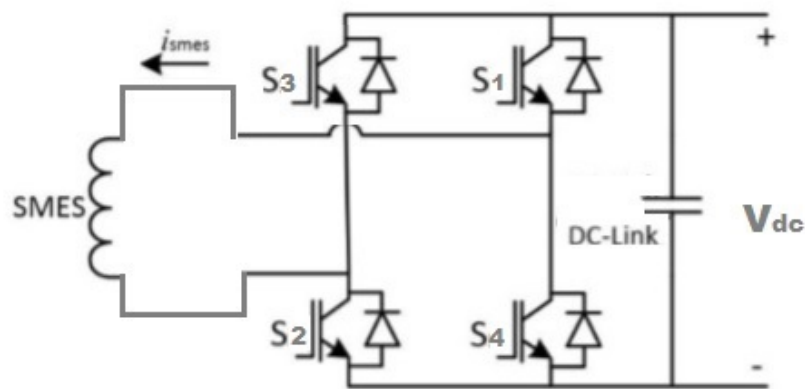


Figure 2.2: Configuración DC Chopper

flujo de corriente en ambos sentidos a través de él, esta característica es fundamental para el diseño de la estación de carga ya que se requiere un flujo de corriente bidireccional en el DC chopper ubicado a la entrada del SMES para que éste pueda cumplir con ciertos modos de operación requeridos

## 2.1 Modos de operación con el DC CHOPPER

### 2.1.1 Modo de carga del SMES

El modo de operación de carga del DC Chopper junto con una acción de control proporcional integral la cual permite el control de la tensión de alimentación del DC Chopper mediante la conmutación de un interruptor manteniendo ésta tensión en un nivel adecuado para la carga del SMES permitiendo que la cantidad de energía que se le demande a la red sea mínima, éste comportamiento se ajusta a una de las características principales del SMES la cual es un tiempo de carga lento para no crear comportamientos anómalos en la red eléctrica. En la figura 2.3 se ilustra la topología y los componentes de la primer etapa del diseño en donde el principal objetivo es acondicionar el sistema para un proceso adecuado de carga para el SMES.

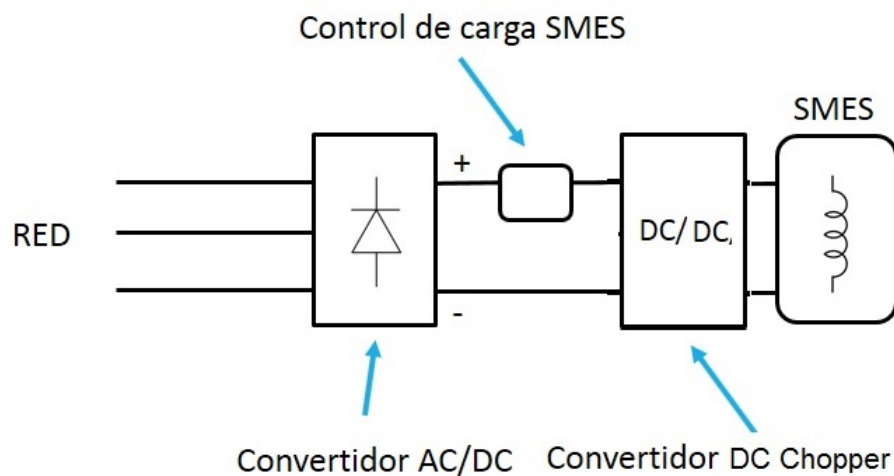


Figure 2.3: Convertidor DC/DC

Para cumplir con el principal objetivo de la primera etapa del diseño se requiere un comportamiento específico de los interruptores que componen el DC Chopper el cual permita

regular la cantidad de potencia suministrada por la red eléctrica. En la figura 2.4 se ilustra el modo de operación del DC Chopper en el proceso de carga del SMES.

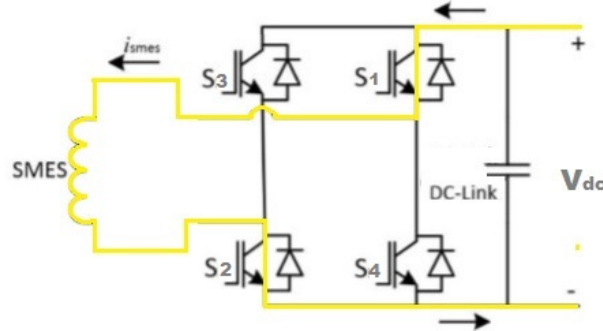


Figure 2.4: Carga del SMES

### 2.1.2 Modo de almacenamiento de energía del SMES

El modo de almacenamiento de energía del SMES se presenta una vez éste se encuentra en nivel máximo de corriente, la corriente a través del SMES es un parámetro fundamental a la hora de definir la capacidad de potencia que es capaz de suplir la estación de carga con SMES. El contenido energético en un campo electromagnético es determinado por la corriente que fluye a través de las espiras de una bobina magnética y puede ser calculado como:

$$E_{SMES} = \frac{I^2 * L}{2} \quad (2.1)$$

- I: Corriente a través del SMES [A]
- L: Valor de la inductancia del SMES [H]

Como se observa en la ecuación 2.1 la energía almacenada por el SMES está principalmente definida por la corriente a través él lo cual permite variar amplio rango la energía almacenada en la estación de carga para posteriormente ser distribuida a los vehículos eléctricos, gracias a las propiedades eléctricas del SMES de almacenamiento de energía en este modo de operación la energía que es inyectada por la red eléctrica a éste se mantiene constante esta característica hace que el SMES puede ser implementado en una estación de carga con el plus de la disposición de grandes paquetes de energía en un instante determinado de tiempo. En la figura 2.5 se muestra el modo de operación de almacenamiento mediante el DC Chopper.

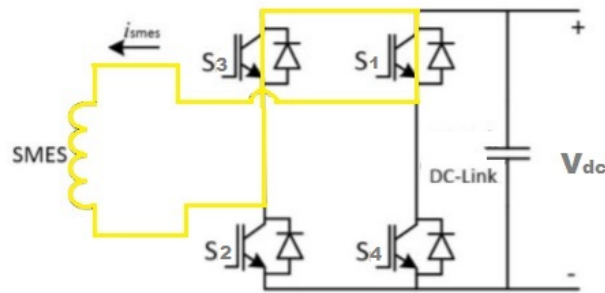


Figure 2.5: Almacenamiento del SMES

### 2.1.3 Modo de descarga de energía del SMES

Definido el proceso adecuado para la carga y almacenamiento del SMES, se emplea mediante el DC Chopper una nueva acción de control para el despacho de energía del SMES hacia el sistema de carga de la batería del vehículo eléctrico, este modo de operación se presenta una vez se conecte el vehículo eléctrico a la estación de carga para que el SMES pueda suministrar la energía almacenada en el proceso de carga. En la figura 2.6 se ilustra el modo de operación del DC Chopper durante el proceso de carga de la batería del vehículo eléctrico.

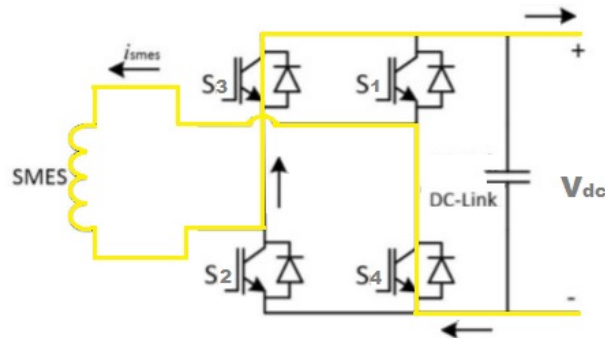


Figure 2.6: Descarga del SMES

Es de notar que el proceso de carga de la batería del vehículo también debe controlarse la potencia que el SMES le entrega a ésta, para esto se emplea nuevamente otro DC Chopper el cual como se menciona anteriormente brinda un control del suministro de la potencia hacia la carga en este caso la batería.





## Capítulo 3

# Simulación de estación de carga rápida para vehículos eléctricos empleando SMES

Una vez obtenidos los componentes y configuraciones de los elementos de la estación de carga rápida para vehículo eléctricos empleando SMES se puede proceder a simular el funcionamiento de dicho sistema con todos sus componentes trabajando conjuntamente, esto con el fin de caracterizar el funcionamiento de la estación bajo las condiciones y modos de operación previamente establecidos en el diseño. En la figura 3.1 se muestra todos los componentes de una estación de carga rápida para vehículo eléctricos empleando SMES.

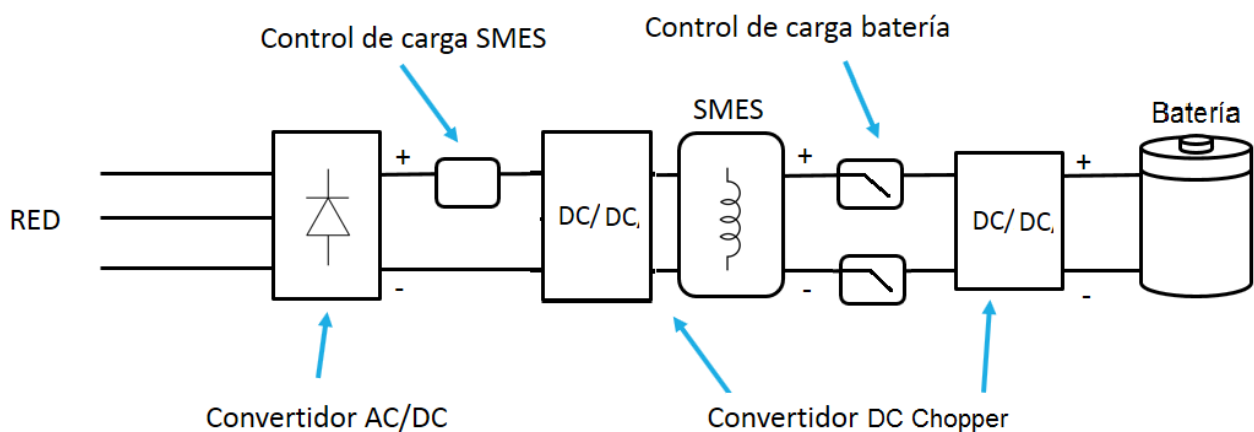


Figure 3.1: Estación de carga

Para simular todos los procesos a los que se ve sometida la estación de carga se hace

uso de softwares especializados como Matlab®. En la imagen 3.2 se muestra el esquema del conjunto de elementos que conforman dicha estación en Simulink de Matlab®.

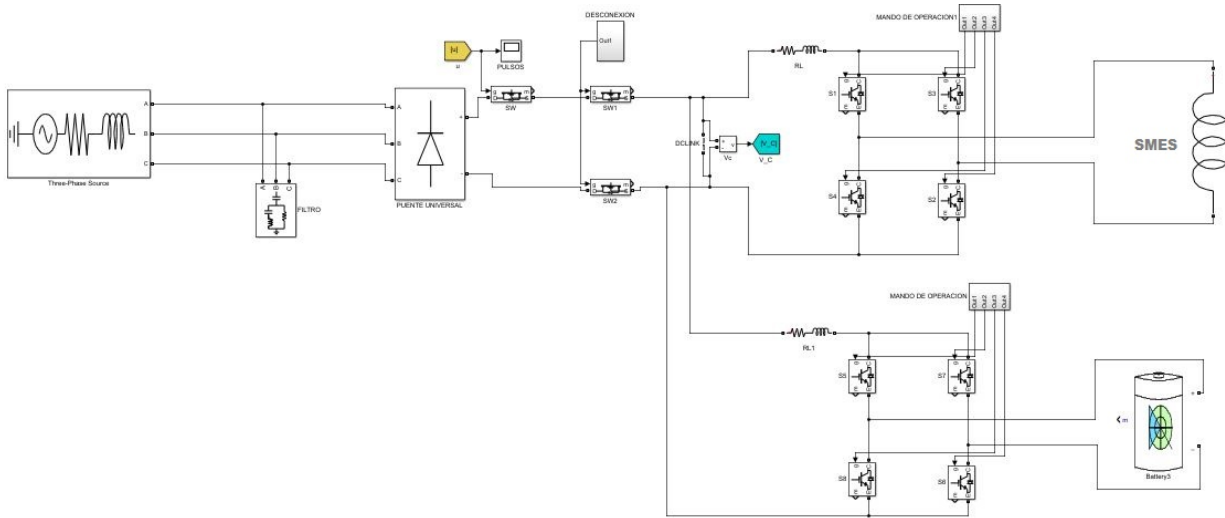


Figure 3.2: Esquema de estación de carga empleando SMES

Cómo se observa en la figura 3.2 en la simulación se emplean dos sistema de control de potencia ambos basado en los modos de operación del DC Chopper anteriormente planteados, en el caso del DC Chopper conectado al SMES los tres modos de operación son empleados en la estación de carga, por otra parte en el DC Chopper el cual está conectada a la batería del vehículo eléctrico solo se hace necesario el modo de operación de carga para controlar la potencia suministrada hacia ésta.

En esta simulación se emplea un sistema de control proporcional integral para control de la tensión de alimentación del SMES como se muestra en la figura 3.3, este método acción de control actúa como un sistema de regulación que trata de aprovechar las ventajas de cada uno de los controladores de acciones básicas, de manera que si la señal de error varía lentamente en el tiempo, predomina la acción proporcional e integral.

La parte proporcional consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional para lograr que el error en estado estacionario se aproxime a cero, la parte integral por otra parte tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por perturbaciones exteriores y los cuales no pueden ser corregidos por el control proporcional. Esta acción de control es fundamental en el funcionamiento de la estación de carga empleando SMES debido a que uno de los objetivos fundamentales es que el SMES se cargue con un nivel constante de tensión demandando pequeñas cantidades de energía a la red eléctrica, éste nivel de tensión de alimentación del SMES el cual podemos asociar al sistema de control mediante referencia "R" como se muestra en la figura 3.4, esta referencia

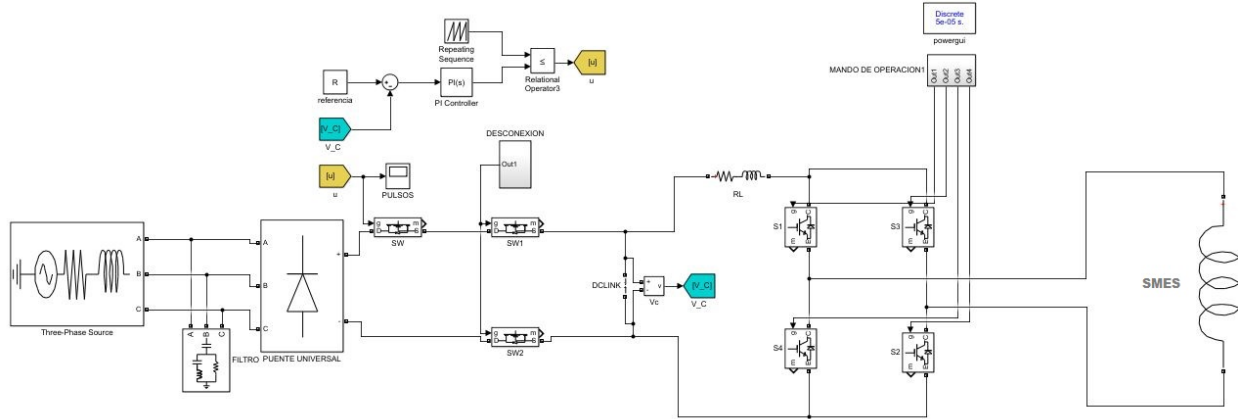


Figure 3.3: Esquema de control de la tensión de alimentación del SMES

debe ser ajustada tal que éste nivel de tensión sea lo suficientemente pequeño para no causar comportamientos anómalos en la red eléctrica.

En el esquema de la estación de carga empleando SMES mostrado en la figura 3.2 se muestra que la simulación de dicha estación posee un par de interruptores los cuales permitan que el SMES trabaje como un sistema independiente a la hora de suministrar la energía almacenada hacia la batería del vehículo eléctrico lo cual es un objetivo fundamental, éstos interruptores cumplen la función de la desconexión del SMES a la red eléctrica aislando el sistema de cara de la batería eléctrica haciendo que la carga de ésta esté en función únicamente de la energía inyectada por el SMES esto es fundamental a la hora de simular todo el proceso de la estación de carga.

En la figura 3.5 se muestra el uso de mandos de operación los cuales permiten la conmutación de los elementos que componen el DC Chopper permitiendo variar su modo de operación mediante pulsos para simular el funcionamiento de la estación de carga empleando SMES. Para cumplir los requisitos del buen funcionamiento de dicha estación de carga es necesario que el DC Chopper que se encuentra conectado al SMES permita el control de la tensión de alimentación de éste mediante la conmutación de interruptores manteniendo ésta tensión en un nivel adecuado para su carga permitiendo que la cantidad de energía que se le demande a la red sea mínima, es de notar que el funcionamiento del DC Chopper debe estar configurado para proporcionar los tres modos de operación anteriormente planteados en el capítulo 2, por otro lado el DC Chopper que se encuentra conectado a la batería del vehículo solo necesitara ser configurado para funcionar bajo el modo de operación de carga.

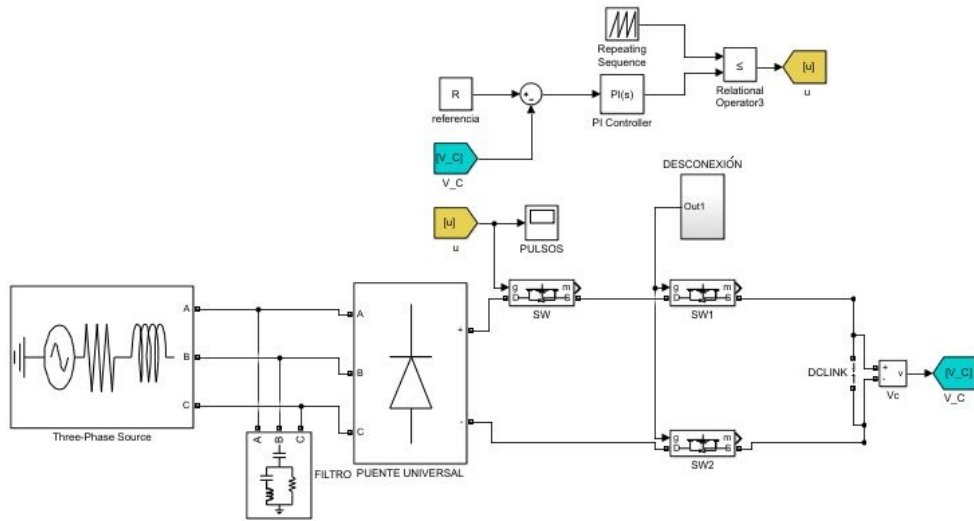


Figure 3.4: Control de tensión de alimentación del SMES

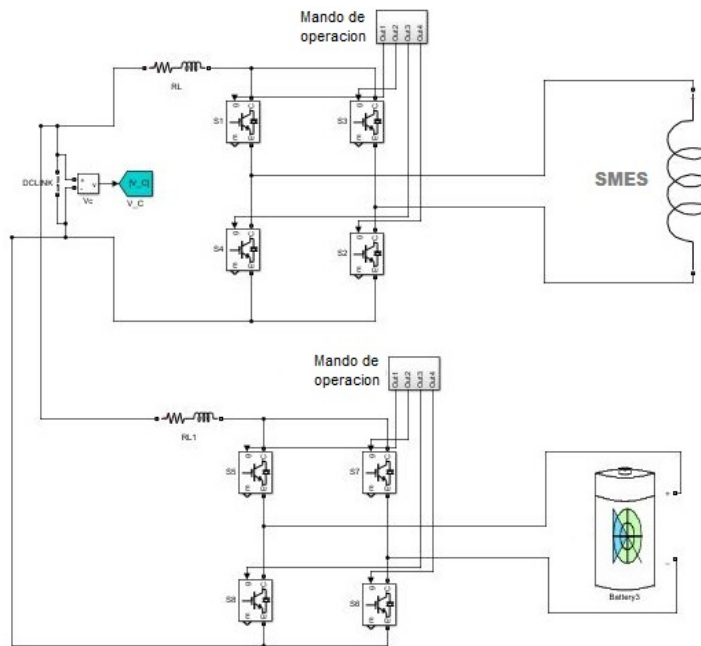


Figure 3.5: Mando de operación del DC Chopper

## Capítulo 4

# Resultados de simulación de estación de carga rápida para vehículos eléctricos empleando SMES

En este capítulo se condensan los resultados obtenidos en las simulaciones de la estación de carga rápida para vehículos eléctricos empleando SMES, estas simulaciones fueron desarrolladas en Matlab® empleando la herramienta de Simulink y bajo los criterios de funcionamiento planteados en el capítulo 3.

Los sistemas de estación de carga para vehículos eléctricos simulados en este capítulo fueron ajustados con el fin de emular diferentes condiciones de operación que se pueden presentar en dichas estaciones, Estos ajustes se basan en la variación de los parámetros de los componentes de la estación de carga.

Las simulaciones de los diferentes casos operativos de la estación de carga servirán para sentar unas bases sobre el funcionamiento, desempeño y adaptabilidad del SMES en éste tipo de aplicaciones.

En estas simulaciones se tiene que el porcentaje inicial de carga de la batería del vehículo eléctrico es cero, esto con el fin de definir el tiempo total de carga del vehículo.

### 4.1 Operación de la estación de carga para vehículos eléctricos gama media

Este modo de operación se simula con los componentes que constituyen la estación de carga empleando SMES como se ilustra en la figura 3.2 del capítulo 3, en esta simulación se busca definir el comportamiento del sistema de estación de carga cuando éste opera en el modo de carga de la batería del vehículo como se define en el capítulo 2.

Los parámetros empleados en esta simulación emulan los de una batería de un vehículo eléctrico gamma media con una capacidad de carga estándar. Los parámetros que caracterizan ésta batería son:

- Tipo de batería: Lithium-Ion
- Voltaje nominal: 42 [V]
- Capacidad nominal: 50 [Ah]

#### 4.1.1 Comportamiento del SMES

En la figura 4.1 se muestra el resultado del comportamiento de la corriente en el SMES respectivamente durante todo el proceso, en la parte inicial del proceso se puede observar un comportamiento típico de la curva de carga de un superconductor magnetico, en la grafica de la corriente se observa que una vez el sistema cambia el modo de operación al almacenamiento de energía, el SMES cumple con su función de almacenar dicha energía sin pérdidas.

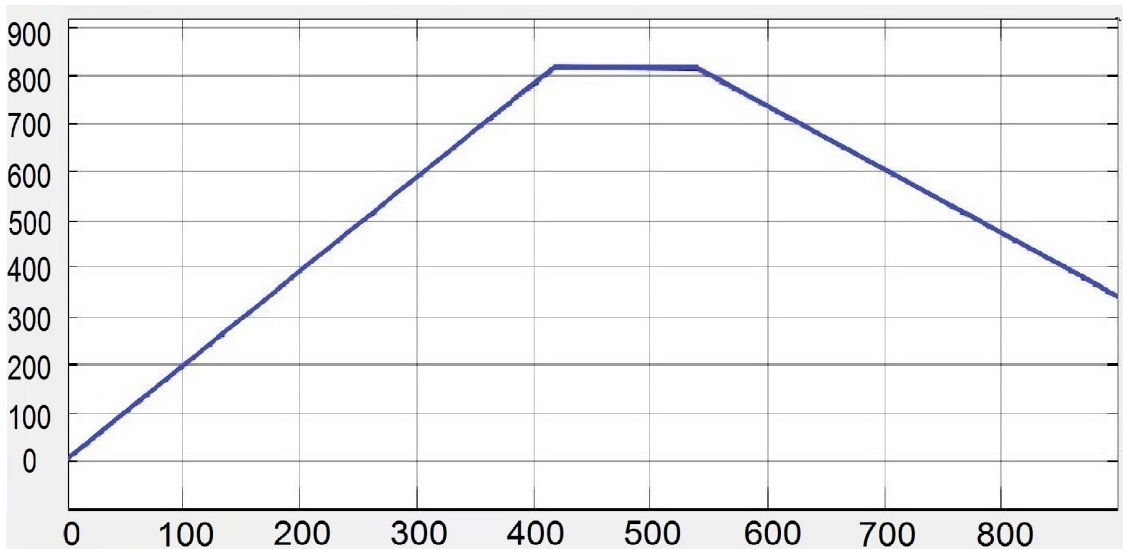


Figure 4.1: Grafico de la corriente en el SMES

En la figura 4.2 se puede observar en el comportamiento de la tension la accion que se le aplica al sistema de control PI como se muestra en el capitulo 3 siendo el voltaje de referencia 100 voltios con el fin de no producir cambios abruptos en la red eléctrica a la cual esta conectada la estación de carga, en esta figura se observa tambien el comporamiento del sistema ante el cambio de modo de operacion del DC Chopper que se encuentra conectado

al SMES cuando pasa del modo de carga del SMES al modo de carga de almacenamiento del SMES tal y como se explica en el capítulo 2. Es de notar que en el modo de operación de almacenamiento del SMES debido a que la configuración del DC Chopper que corto circuitar el SMES su tensión se hace cero.

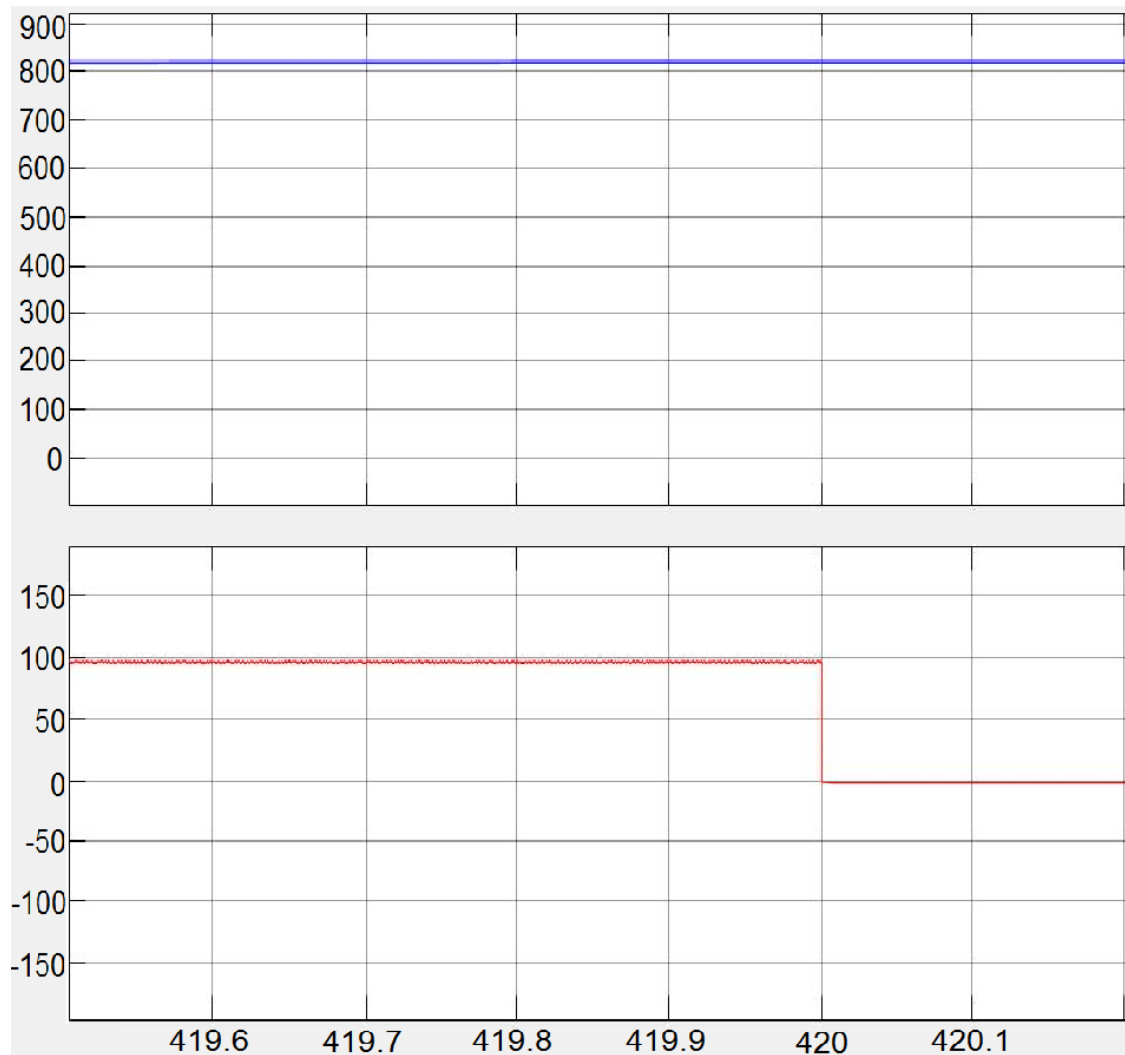


Figure 4.2: Grafico del control de la tensión en el SMES

en la figura 4.3 se muestra el resultado del comportamiento de la corriente en terminales del DC Chopper, en esta figura se puede observar como están relacionados los tres modos de operación de DC Chopper tal como se plantean en el capítulo 2, inicialmente se nota el comportamiento del modo de operación de carga del SMES durante el primer intervalo

de tiempo [0-420] segundos, en la segunda etapa de la simulación en el intervalo [420,5-540] segundos se puede ver como la corriente toma un valor de 0 [A] esto debido a que el SMES en este intervalo de tiempo no demanda energía de la red eléctrica tal como en el modo de almacenamiento de energía del SMES, en la última etapa de la simulación se evidencia el comportamiento del sistema bajo el modo de descarga de energía del SMES entregando casi el total de su potencia almacenada, lo cual es suficiente para ofrecer una carga del 95% de la batería del vehículo eléctrico en un corto periodo de tiempo tal y como se muestra en la figura 4.4.

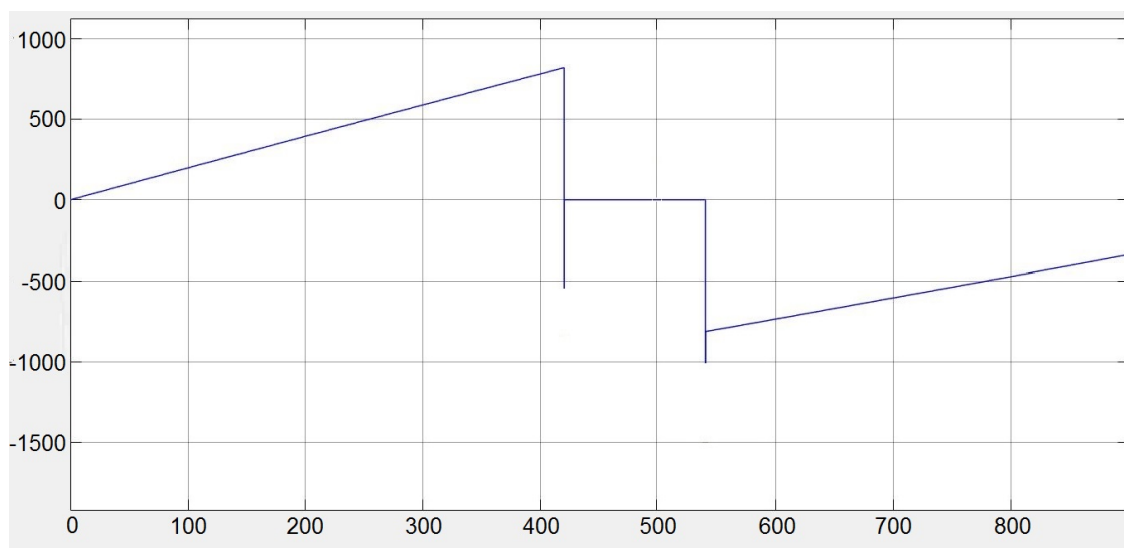


Figure 4.3: Grafico del corriente en terminales del DC Chopper

### 4.1.2 Comportamiento de la batería del vehículo

En la figura 4.4 se muestra el resultado del porcentaje de carga de la batería del vehículo durante el proceso de descarga de energía del SMES, en la figura se puede observar el instante de tiempo en que el SMES inicia a inyectar la energía almacenada a la batería mediante el DC Chopper.

El periodo de tiempo en que tarda el SMES en cargar el 95% son 6 minutos un tiempo de carga el cual permite clasificar a la estación de carga empleando SMES como un sistema de carga ultra rápida para vehículos eléctricos. Aunque este tipo de carga es considerada aún experimental y sólo en vehículos eléctricos con acumuladores de tipo supercondensadores, es decir algunos autobuses, Sin embargo como se aprecia en la figura 4.4 la estación de carga empleando SMES se ajusta perfectamente para la carga de vehículos eléctricos convencionales,



esto gracias a que la potencia de recarga es muy elevada disminuyendo el tiempo de recargar las baterías.

La disminución en el tiempo de carga permite al usuario tener mucha más. Solo utilizando carga rápida, se puede lograr una disponibilidad de 23.5 horas en el día disponibilidad del 98% del tiempo y una autonomía en este tipo de vehículos de hasta 200km.

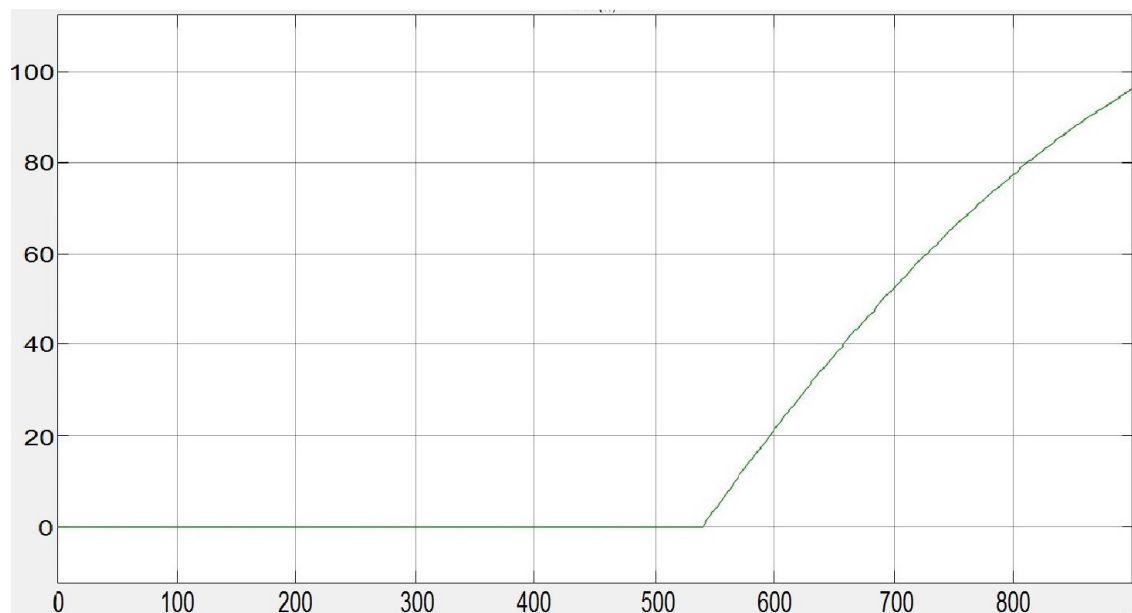


Figure 4.4: Porcentaje de carga de la batería



# Capítulo 5

## Conclusiones

SMES es una tecnología de almacenamiento de energía que tiene mucho potencial debido a su capacidad de almacenar grandes cantidades de energía y aún ser rentable en comparación con otros sistemas de almacenamiento. El mayor reto que presenta es reducir el costo total del sistema, pero avances en los sistemas de refrigeración criogénica y el desarrollo de mejores superconductores puede llevar a que su aplicación sea mucho más comercial.

La energía almacenada por el SMES está principalmente definida por la corriente a través él, gracias a esto con un alto valor de inductancia la estación de carga puede ser ajustada para variar su capacidad de potencia almacenada en un amplio rango de operación dependiendo del número máximo permitido de vehículos conectados a la estación. Esto le brinda mucha versatilidad a la estación de carga.

Dependiendo de la batería y el tipo de vehículo, se puede lograr fácilmente una recarga suficiente para un recorrido de más de 100 km en menos de 5 min. A medida que las tecnologías de la batería avanzan continuamente, la recarga estará disponible con la velocidad y la simplicidad de una parada de combustible de hoy en día.

El SMES puede ser adaptado a una estación de carga para vehículos eléctricos para proporcionar una recarga ultra rápida, ésta tecnología aunque se considera todavía experimental posee buenas proyecciones hacia aplicaciones relacionadas con estaciones de carga. Aunque este tipo de recarga ultra rápida en vehículos eléctricos a prueba con acumuladores de tipo supercondensadores como es el caso de algunos autobuses eléctricos. La potencia de recarga es muy elevada, y en unos cinco o diez minutos se pueden recargar las baterías. Las baterías de iones de litio empleadas en las simulaciones no soportan la temperatura tan elevada que provoca este tipo de recarga pues deteriora gravemente su vida útil.

Las características constructivas de la estación de carga permiten que el SMES entregue directamente la energía almacenada en DC a la batería del vehículo eléctrico lo cual hace que

el sistema de carga sea más versátil que otros sistemas que cargan la batería mediante AC ya que estos sistemas requieren en el vehículo un cargador interno.

Se ha descrito una aplicación exitosa de la tecnología de almacenamiento superconductor en donde se presentan las mediciones reales que caracterizan el rendimiento de una estación de carga empleando SMES. Estos muestran la capacidad del SMES para almacenar la potencia a través de él para posteriormente inyectarla a las baterías de vehículos eléctricos de diferentes clases en un corto periodo de tiempo, mejorando significativamente el tiempo de carga de dicho vehículos, permitiendo a los usuarios gozar de una mayor disponibilidad de su vehículo. Algunas mejoras futuras que pueden mejorar aún más la aplicabilidad incluyen: optimización del controlador (variaciones de voltaje reducidas durante los remanentes), niveles reducidos de distorsión armónica a través del diseño del inversor y / o filtros, y clasificaciones incrementadas para la protección de cargas más grandes.

# Bibliografía

- [1] J. A. Guacaneme, D. Velasco, and C. L. Trujillo, “Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en micro redes,” *Información tecnológica*, vol. 25, no. 2, pp. 175–188, 2014.
- [2] F. Posso, “Energía y ambiente: pasado, presente y futuro. parte dos: sistema energético basado en energías alternativas,” *Geoenseñanza*, vol. 7, no. 1-2, 2002.
- [3] A. García Gorriá *et al.*, “Tecnologías de almacenamiento de energía en la red eléctrica,” 2017.
- [4] P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, M. L. Crow, A. Arsoy, and Y. Liu, “Energy storage systems for advanced power applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 12, pp. 1744–1756, 2001.
- [5] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, “Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation,” *Applied Energy*, vol. 137, pp. 511–536, 2015.
- [6] A. M. Omer, “Energy, environment and sustainable development,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 12, no. 9, pp. 2265–2300, 2008.
- [7] I. Dincer, “Renewable energy and sustainable development: a crucial review,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 4, no. 2, pp. 157–175, 2000.
- [8] M. Rousselle, “Impact of the electric vehicle on the electric system,” 2009.
- [9] S. C. Wang, J. X. Jin, and Y. L. Wang, “Smes effect in a smart grid with electric vehicles,” in *Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), 2015 IEEE International Conference on*. IEEE, 2015, pp. 530–531.
- [10] Y. Liu, Y. Tang, J. Shi, X. Shi, J. Deng, and K. Gong, “Application of small-sized smes in an ev charging station with dc bus and pv system,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, no. 3, pp. 1–6, 2015.